

# 非均匀结构超材料天线罩的研究

夏 寒,葛俊祥,于 兵

(南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室,南京 210044)

**摘 要:**提出了一种非均匀排列超材料结构.通过理论计算,该结构在 Ku 频段内的等效相对介电常数可以控制在 0 到 1 之间.该结构可用于天线罩提高天线的增益.分别对单个微带天线、 $2 \times 2$  微带阵列天线、 $4 \times 4$  微带阵列天线 3 种情况加载超材料天线罩的效果进行仿真.仿真结果表明:超材料天线罩对提高天线及天线阵增益的效果随着天线单元数的增加而减弱,如单个微带天线增益可提高 6 dB,而  $4 \times 4$  微带阵列天线增益的提高只有 1.6 dB.

**关键词:**非均匀结构;超材料;微带天线;增益;天线罩

**中图分类号:**TN820.8;O45

**文献标志码:**A

左手材料早在 20 世纪 60 年代由 Veselago 理论上对负介电常数和负磁导率进行深入计算,并发现了如负折射率效应,超级透镜等电磁学特性<sup>[1]</sup>,但是自然界并不存在左手材料,且受限于当时的工业技术水平,该理论未能引起科技界的重视.直到 20 世纪 90 年代,由 Pendry 等人<sup>[2-4]</sup>相继提出理论模型以及在微波波段可以由毫米级的结构实现左手材料,加速了其在微波领域的应用.

利用左手材料改善微带天线方向性和辐射效率是近年来天线领域的一个研究热点.其中一种方法是左手材料作为天线基板<sup>[5-8]</sup>,通过设计完全吸收材料并周期排布于普通微带天线基板上,可以抑制天线表面波辐射,改善微带天线性能;另一种较为常用的方法是将左手材料或零折射率作为天线罩置于天线上方<sup>[9-12]</sup>,等效为非均匀平板透镜,当电磁波通过时波束会发生会聚,远场区波束宽度变窄,大幅改善天线的增益.然而,左手材料中的负磁导率与负介电常数 2 种结构会相互产生不同程度的影响<sup>[13]</sup>,单元间也会产生耦合<sup>[14]</sup>,从而影响左手材料的性质和频带宽度,且上述文献都只对单个微带天线的性能进行改善,未对阵列天线情况进行仿真与分析,因此,需要探索出一种同样具有“汇聚”作用且性质相对稳定的超材料,改善天线增益性能.

本文使用金属导线非均匀排列结构,在不改变磁导率的前提下构造出整体等效介电常数在 0 到 1 之间的超材料,将其作为天线罩分别置于单个微带天线、 $2 \times 2$  和  $4 \times 4$  微带阵列天线上,使用 HFSS 软件优化材料结构参数.仿真结果表明,由于这种结构的加入,均能对 3 种天线增益有不同程度的改善,且利于加工实现,可置于有低轮廓要求天线的天线罩内部.

## 1 非均匀结构超材料

Pendry 教授通过近似理论分析得出了图 1 中一维周期排列金属导线阵列结构等效相对介电常数可以表示为

$$\epsilon_{\text{metal}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (1)$$

收稿日期:2014-04-22;修回日期:2014-05-19.

基金项目:国家自然科学基金(61372066)

作者简介:夏 寒(1989—),男,江苏南京人,南京信息工程大学硕士研究生,研究方向:微波天线技术.

通信作者:葛俊祥(1960—),男,江苏南京人,南京信息工程大学教授,博士生导师,主要从事雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁散射与绕射理论的研究,E-mail:jxge@nuist.edu.cn

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)}, \tag{2}$$

其中,  $\omega_p$  是金属导线结构的等离子频率;  $\omega$  是角频率;  $a$  是金属导线间距也即周期尺寸;  $r$  是金属导线半径. 当  $\omega = 2\pi f, f = 15 \text{ GHz}, r = 0.2 \text{ mm}$  时, 通过合理选择导线间距  $a$ , 使等效介电常数  $0 < \epsilon_{\text{metal}} < 1$ .<sup>[13]</sup> 将上述参数带入上式(1)、(2) 可以得出图 2 所示的等效相对介电常数与金属导线间距之间的关系曲线图.

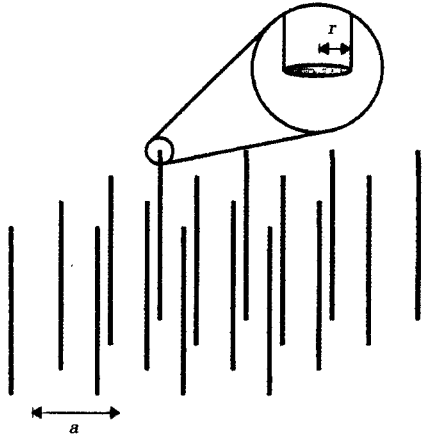


图1 一维周期排列金属线阵列结构

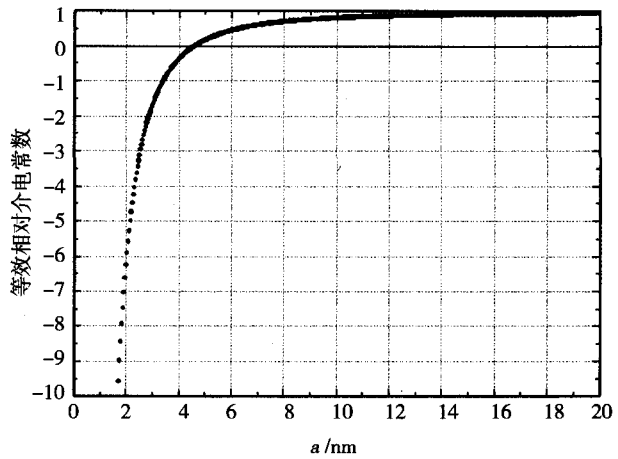


图2 金属导线间距与等效相对介电常数关系曲线

由图 2 可知, 当  $a \geq 4.52$  时,  $\epsilon_{\text{metal}} > 0$ , 并随着导线间距增大, 趋近与 1. 希望通过如图 3 所示的非均匀排列金属导线结构, 在不改变磁导率  $\mu$  的前提下, 形成一层等效相对介电常数在 0 到 1 之间变化的超材料, 置于天线上方, 金属导线与天线辐射电磁波的电场极化方向平行.

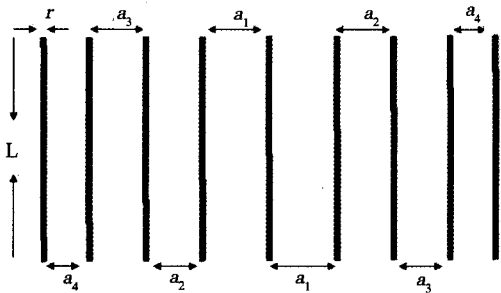


图3 非均匀结构超材料

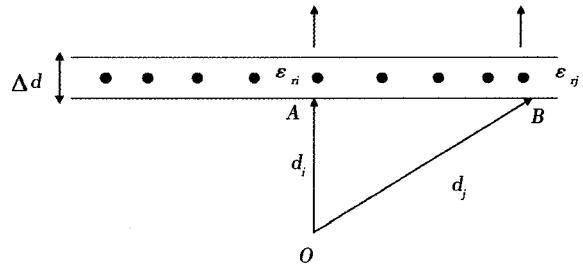


图4 非均匀结构超材料侧视图

图 4 是图 3 超材料结构的侧视图. 天线放置于  $O$  点辐射电磁波. 若  $\Delta d$  超材料层等效为光学中的凸透镜, 对电磁波具有汇聚作用, 则电磁波沿  $OA - \Delta d$  路径的传播时间与  $OB - \Delta d$  路径的传播时间应相等, 即

$$\frac{d_i}{c_0} + \frac{\Delta d}{v_i} = \frac{d_j}{c_0} + \frac{\Delta d}{v_j},$$

上式中,  $c_0 = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  为空气中光的传播速度.  $v_i = c_0/\sqrt{\epsilon_{ni}}, v_j = c_0/\sqrt{\epsilon_{nj}}$  分别是电磁波进入超材料层中等效相对介电常数为  $\epsilon_{ni}, \epsilon_{nj}$  区域中的传播速度. 带入式(3) 可得  $d_j - d_i = \Delta d(\sqrt{\epsilon_{ni}} - \sqrt{\epsilon_{nj}})$ . 由于  $d_j > d_i$ , 可知只有  $\epsilon_{ni} > \epsilon_{nj}$ , 才能保证沿不同路径的电磁波经过超材料层后同时到达一层等相位面, 产生类似凸透镜的汇聚效果. 通过图 2 中的曲线可知, 当图 3 中的金属导线间距  $a_1 > a_2 > a_3 > a_4 \geq 4.52 \text{ mm}$  时, 可以形成一层等效相对介电常数由中心向两边缘逐渐减小且大于零的超材料层, 并作为天线罩置于天线上方, 实现天线的高定向性辐射.

## 2 数值仿真与分析

### 2.1 微带天线设计与仿真

使用 HFSS 电磁仿真软件仿真设计中心频率为 15 GHz 的单个微带天线, 并进行参数优化. 基板置于地板上, 其大小  $L_0=8.38$  mm,  $W_0=11.6$  mm, 厚度  $H=1$  mm, 贴片尺寸为  $L_1=4.19$  mm,  $W_1=5.8$  mm, 使用同轴线馈电. 将非均匀排列金属导线超材料层置于天线上方, 如图 5 所示, 金属导线方向与贴片  $L_1$  边平行, 距离天线上方 8 mm. 导线尺寸  $a_1=9.2$  mm,  $a_2=6$  mm,  $a_3=5$  mm,  $a_4=4.52$  mm,  $L=40$  mm.

图 6 是单个微带天线与加载超材料天线罩后的增益方向图、 $S_{11}$  仿真结果的对比. 可以看出, 由于超材料天线罩的加入, 单个微带天线增益在中心频率处增加了 6 dB. 半功率波束宽度收缩了  $23^\circ$ ,  $S_{11}$  中心频率点相比原来略微发生偏移.

### 2.2 微带阵列天线设计与仿真

为了验证超材料结构对微带阵列天线是否有较好的改善, 在上述单个微带天线基础上, 设计如图 7 所示的  $2 \times 2$  和  $4 \times 4$  微带阵列天线结构, 并分别加上超材料天线罩进行对比仿真. 天线整体采用双层基板结构, 阵元位于第一层介质板上方, 阵元间距为 10 mm, 即中心频率波长一半. 第二层介质板下方为馈电网络, 同样使用同轴线对阵元馈电. 金属接地板位于第二层介质板上方和第一层介质板下方重合处. 使用 HFSS 仿真软件对馈线尺寸进行优化设计.

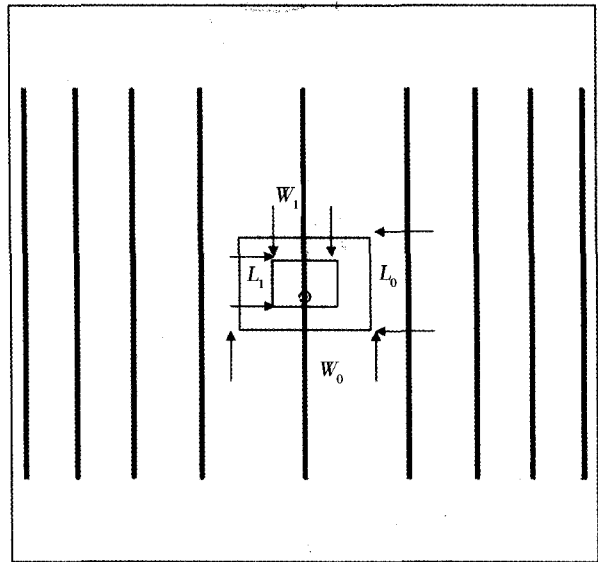


图5 单个微带天线超材料结构图

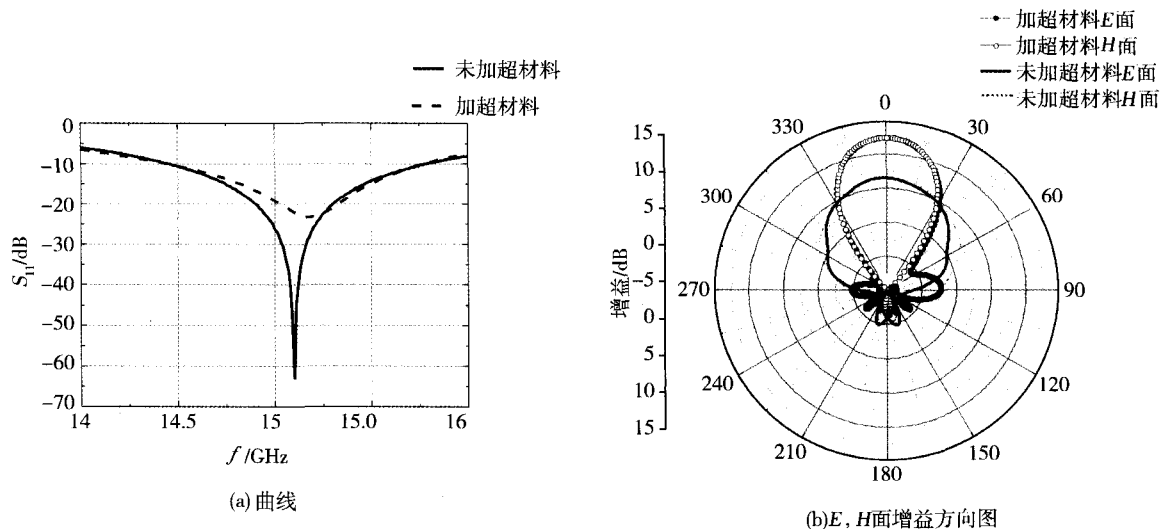


图6 单个微带天线仿真结果对比

图 7(a) 中加载于  $2 \times 2$  阵列天线之上的超材料结构, 采用与单个微带天线情况相同的导线间距分布, 通过优化导线长度  $L$  与超材料距离阵元的高度  $h$ , 在保证天线具有较好的阻抗匹配的同时, 改善天线整体的增益性能. 对于图 7(b) 中的  $4 \times 4$  阵列天线, 由于阵元数的增加, 总体口径面积变大, 需要加入两排超材料结构, 以充分改善每个单元天线的增益, 从而改善该 16 阵元天线的整体增益.

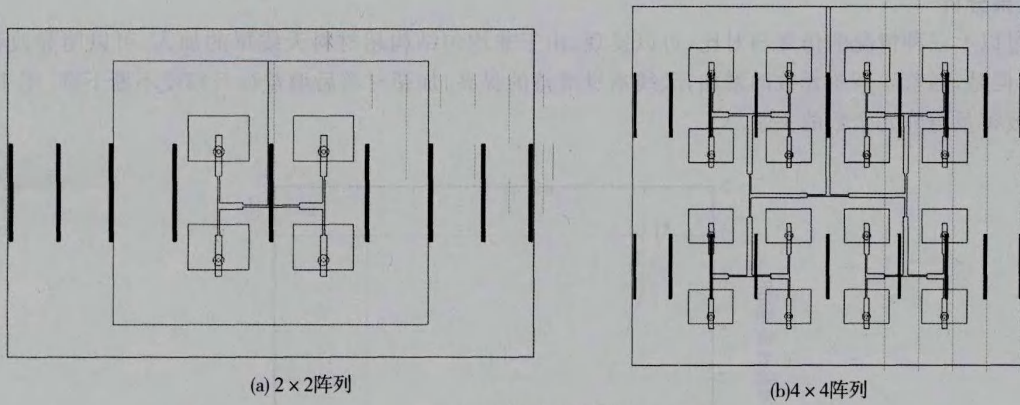


图7 阵列天线超材料结构

图 8 是  $2 \times 2$  阵列天线仿真结果对比图. 经过对金属导线参数优化, 导线长度  $L=9$  mm, 距离天线表面 10 mm. 天线增益在中心频率处增加约 3.9 dB, 半功率波束宽度收缩了  $10^\circ$ ,  $S_{11}$  谐振点偏移至 14.66 GHz 处. 相比于单阵元情况, 增益改善度下降.

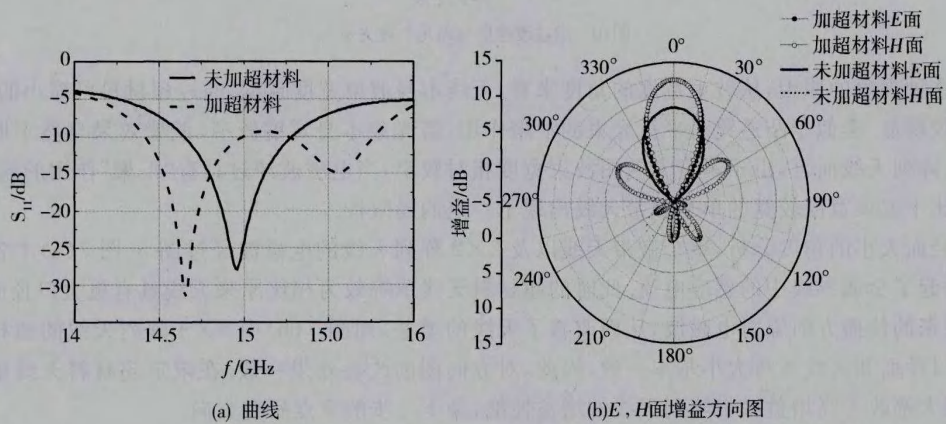


图8  $2 \times 2$  阵列天线仿真结果对比

图 9 是  $4 \times 4$  阵列天线仿真结果对比图. 可以看出, 此时增益只提高了约 1.7 dB, 波束宽度收缩了  $3^\circ$ ,  $S_{11}$  中心频率点发生略微偏移. 超材料结构与  $2 \times 2$  阵列天线相同.

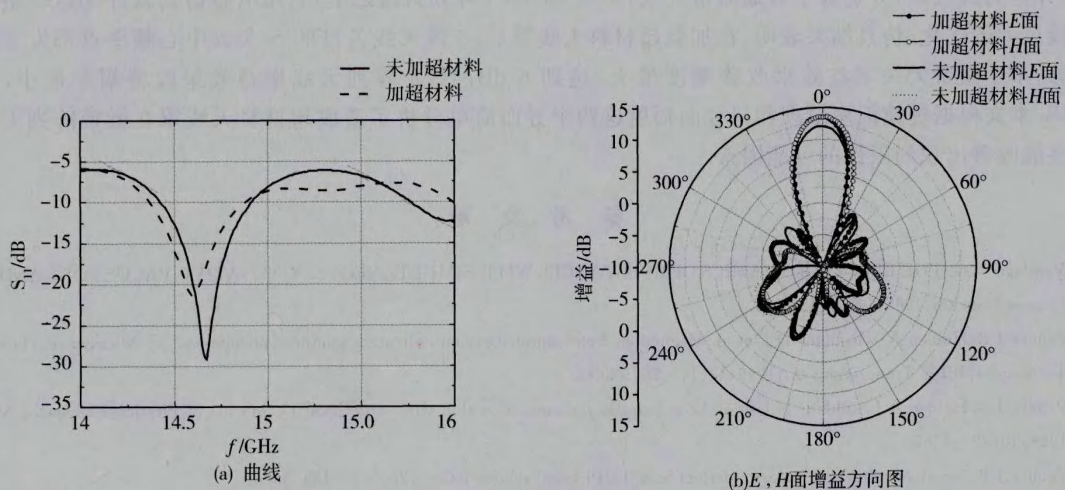


图9  $4 \times 4$  阵列天线仿真结果对比

### 2.3 结果分析

通过以上三种情况的仿真与对比,可以发现,由于非均匀结构超材料天线罩的加入,可以明显改善天线的增益.但是,随着阵列单元数的增加,天线本身增益的提高,加超材料后增益提升幅度不断下降.图10给出了增益改善量与阵元个数的关系.

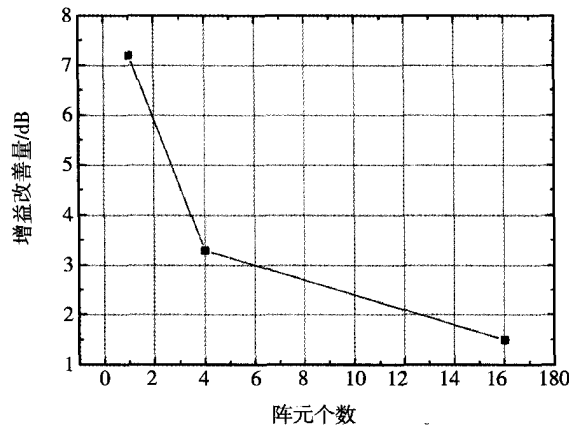


图10 增益改善量与阵元个数关系图

产生这种现象的原因,从波束宽度的角度来看,天线本身波束宽度越宽,通过超材料可缩小的度数越大,改善效果较明显.类似于凸透镜对平行光束的汇聚作用,若光束本身宽度较窄,汇聚效果自然不明显.因此,对于 $4 \times 4$ 阵列天线而言,由于本身方向图波束宽度相对较窄,当电磁波经过具有“汇聚”作用的超材料时,改善效果相比于波束宽度较宽的单个微带天线出现了一定的局限性.

从口径面大小的角度分析,单个微带天线以及 $2 \times 2$ 阵列天线的电磁波经过图5、图7(a)中各自的超材料层时,激起了金属导线中的感应电流.此时的超材料天线罩等效为相比原来天线具有更大口径面的二次辐射源,向原来的传播方向辐射电磁波,从而改善了天线的增益.而图7(b)中 $4 \times 4$ 阵列天线的超材料层所具有的有效口径面和天线本身大小基本一致,因此,对方向图的改善效果一般.在限定超材料天线罩大小的条件下,如何大幅改善高增益微带阵列天线的增益性能,是下一步的重点研究方向.

### 3 结 语

使用非均匀金属导线排列结构,设计出等效相对介电常数在0到1之间的超材料,用以改善天线的辐射性能.并作为天线罩,分别置于普通微带天线, $2 \times 2$ 和 $4 \times 4$ 阵列天线之上,利用电磁仿真软件HFSS进行金属导线尺寸的优化.仿真结果表明:在加载超材料天线罩后,3种天线各自的S参数中心频率点都发生略微的偏移;单个微带天线增益效果改善幅度最大,达到6 dB; $4 \times 4$ 阵列天线增益效果改善幅度最小,只有1.6 dB.本文根据透镜汇聚原理和口径面辐射这两个方面简单分析了造成超材料天线罩在微带阵列天线情况下性能改善出现局限性的可能因素.

### 参 考 文 献

- [1] Veselago V G. THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF  $\epsilon$  AND  $\mu$ [J]. *Physics-Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Low frequency plasmons in thin-wire structures[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, 10(22): 4785.
- [4] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical review letters*, 2000, 85(18): 3966.
- [5] Baccarelli P, Burghignoli P, Lovat G, et al. Surface-wave suppression in a double-negative metamaterial grounded slab[J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 2003, 2(1): 269-272.

- [6] 朱忠奎,罗春荣,赵晓鹏.一种新型的树枝状负磁导率材料微带天线[J].物理学报,2009,58(9):6152-6157.
- [7] 赵晓鹏,张燕萍,刘亚红,等.基于完全吸收超材料的高增益微带天线[J].电波科学学报,2012,2:035.
- [8] 保石,罗春荣,赵晓鹏.S波段超材料完全吸收基板微带天线[J].物理学报,2011,60(1):014101.
- [9] Chacko B P, Augustin G, Denidni T A. A high-gain antenna based on zero-index metamaterial superstrate[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE, Nanjing, 2013.
- [10] 郭林燕,杨河林,李敏华,等.单方环结构左手材料微带天线[J].物理学报,2012,61(1):14102.
- [11] Shavit R, Joffe R, Falek E. Planar Ka band antenna for satellite communication based on metamaterial technology[C]. Tel Aviv: Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013:1-3.
- [12] 蒲天乐,黄卡玛,王波.基于零折射率超材料的新型匹配高增益贴片天线[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(2):116-120.
- [13] 黄勇军,文光俊,李天情,等.电磁超材料中负磁导率对负介电常数的影响[J].强激光与粒子束,2010,22(10):2457-2460.
- [14] 王甲富,屈绍波,徐卓,等.基于金属结构单元间耦合的左手材料的设计及实验验证[J].物理学报,2010,59(6):4018-4022.

## Research on Metamaterial Radome with Inhomogenous Structure

XIA Han, GE Junxiang, YU Bing

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing  
University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** A kind of metamaterial with inhomogenous structure was designed. Its equivalent relative permittivity in Ku band can be controlled between 0 and 1 by theoretical calculation. This structure is used as a radome to improve the antenna gain. We put the metamaterial radome on the single microstrip antenna,  $2 \times 2$  microstrip array antenna,  $4 \times 4$  microstrip array antenna respectively and simulate them in HFSS. The simulation results show that the improvement on the single microstrip antenna and array antenna weaken as the increase of antenna unit, such as the enhancement of gain on the single microstrip antenna is 6 dB, while the  $4 \times 4$  microstrip array antenna is only 1.5 dB.

**Keywords:** inhomogenous structure; metamaterial; microstrip antenna; gain; radome